第 39 卷 第 1 期
2021 年 3 月

天 文 学 进 展
PROGRESS IN ASTRONOMY

Vol. 39, No. 1
Mar., 2021

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2021.01.01

太阳系外行星探测研究进展

王佳琪[1,2]，王汇娟[1,2]，王 炜[1,3]，刘玉娟[1]，郑 捷[1]，姜晓军[1,2]

(1. 中国科学院 国家天文台 光学天文重点实验室，北京 100101； 2. 中国科学院大学 天文与空间科学学院，北京 100049； 3.中国科学院 国家天文台 南美天文中心，北京 100101)

摘要： 太阳系外行星作为研究恒星演化重要的天体和探索生命起源的基础，多年来一直是天文学前沿研究的热点之一，目前已发展出近 10 种系外行星的探测方法。随着天文观测设备探测精度越来越高，自 1992 年至今，已发现 4 000 余颗系外行星。近几年天基天文观测手段日趋成熟，探测系外行星的精度与效率得到了极大提高，并带动着更多地基系外行星探测项目开展。继目前最成功的太阳系外行星探测卫星开普勒 (Kepler) 之后，2018 年 4 月 TESS 卫星成功发射，全球各地大量天文学家和地基光学望远镜设备纷纷加入太阳系外行星后随测光和光谱观测中，系外行星探测研究迎来了“黄金时代”。介绍了目前系外行星的探测方法和代表性探测项目，综述了类地行星、气态巨行星的探测研究现状和演化理论，并对未来 5 ～ 10 年内系外行星探测研究的发展趋势进行了展望。

关 键 词： 太阳系外行星；天基观测；后随观测；测光观测；光谱观测

中图分类号： P185 **文献标识码：** A

1 引 言

太阳系以外的行星被称为太阳系外行星 (以下简称系外行星)。早在 17 世纪人类就开始对太阳系内的天体进行观测，逐渐对太阳与太阳系行星之间的物理联系有了更多了解。通过探测和研究太阳系内的行星、彗星及小行星，我们可以得到太阳系的组成和演化形成过程。而我们身处的宇宙包含众多星系与星系团，它们的基本组成单元是恒星。这些星系包含着千亿颗类太阳恒星，它们也可能与太阳系一样包含类似地球或木星的行星系统。利用现有的天文观测手段，如测光观测、光谱观测等方法，发现和证认这些系外行星，并对它们的物理特性进行研究，不仅可以揭示系外行星的化学成分、演化形成过程和行星与主星的联系，而且

收稿日期： 2020-06-19； **修回日期：** 2020-11-13

资助项目： 国家自然科学基金 (U1831209)；中国科学院先导项目 (XDB23040100)；国家重点研发计划 (2016YFA0400804)；民用航天预研项目 (D020302)；国家天文台星云人才 B 类 (XDA15016200)；空间科学研究院国家天文台培育项目 (2020000030)

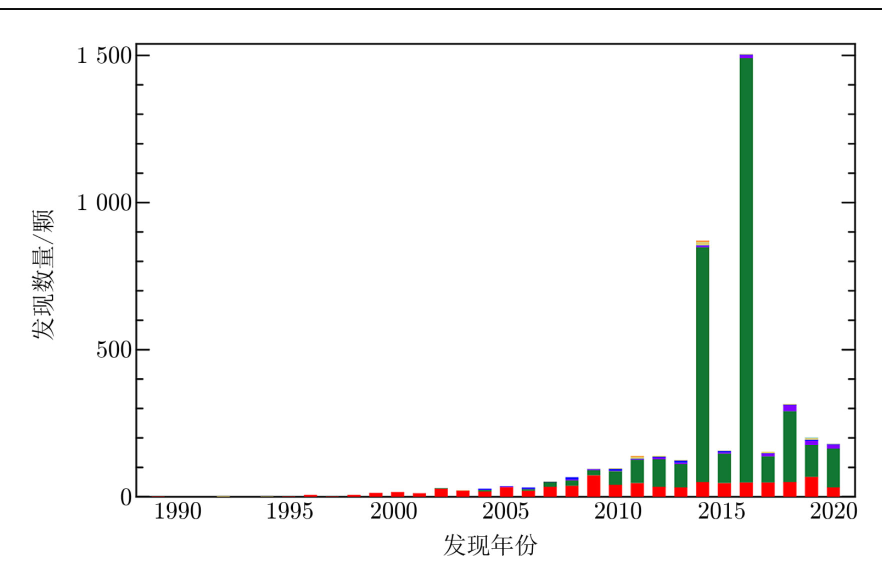
通讯作者： 姜晓军，xjjiang@nao.cas.cn

结合我们目前对太阳系的了解，可以进一步分析不同行星系统之间的共性与差异，进而了解行星与生命的起源，探索恒星、星系以及宇宙的起源。

20 世纪中期，随着天体力学与天体测量学的发展与完善，天文观测获得的天体位置精度逐渐提高。20 世纪 90 年代，空间望远镜的出现很大程度推动了天体测量与天体物理观测的精度。此时有关恒星与行星的天体测量精度已经达到了 0.001″ 的量级[1]，天文学家对太阳系行星与其他恒星的探索与研究取得了长足的进展，技术、天文研究方法的进步提高了天体成像的精度、空间和时间分辨率[2–4]。通过对一些恒星进行观测研究，发现了疑似系外行星的“伴星”，天文学家认为这些伴星可能是围绕恒星公转的太阳系外行星，于是人们将寻找行星的目光投向了太阳系以外的宇宙。

1992 年，Wolszczan 与 Frail[5] 探测到脉冲星 PSR 1257+12 脉冲到达时间存在周期性的变化，从而发现了围绕着这颗毫秒脉冲星公转的 2 颗质量分别为 $4.3M_{\oplus}$ ($M_{\oplus}$ 表示地球质量)和 $3.9M_{\oplus}$ 的伴星 PSR 1257+12 c, d；在后续的观测中，Wolszczan[6] 又发现了另外 1 颗质量为 $0.02M_{\oplus}$ 的行星 PSR 1257+12 b。1995 年，Mayor 与 Queloz[7] 通过监测一批 K 型和 G 型矮星的视向速度变化，发现了第一颗围绕类太阳恒星公转的系外行星飞马座 51 b；这项重大的发现意味着系外行星探索时代的开始。在 2019 年 10 月，Mayor 和 Queloz 也因为这项发现获得了诺贝尔物理学奖。此后系外行星的探测方法与技术也在不断发展并日趋成熟，但由于系外行星距离地球太远而且本身不发光，地基望远镜对系外行星的探测能力有限，自 1992 年发现首颗太阳系外行星，到 2009 年开普勒望远镜发射前，人类仅发现 400 余颗系外行星。

2000 年，Henry 等人[8] 与 Charbonneau 等人[9] 分别独立发现了存在凌星现象的系外行星 HD 209458 b，这颗与飞马座 51 b 类似的系外行星，同样也是围绕一颗类太阳恒星公转。在开普勒空间望远镜[10] 发射之前，天体的测光精度已经达到了足以探测系外行星发生凌星时其主星光变的量级，但由于影响地基望远镜观测能力的环境因素，如视宁度等受到地球大气的限制，在 2000−2009 年期间，使用凌星法发现的系外行星只有 50 余颗。2009 年，开普勒望远镜发射升空，计划服役 4 a。在实际服役的 9 a 中，对约 50 万颗恒星进行光度变化的监测，搜寻可能存在系外行星的候选体目标。开普勒望远镜的发射使系外行星发现的数量提高了 1 个量级，扩充了系外行星的研究样本。开普勒望远镜在 2018 年 11 月结束了探测系外行星的使命。利用开普勒望远镜开展大规模的系外行星搜寻，我们发现宇宙中存在的大量系外行星，还观测到恒星周围普遍存在行星[11]。为了开展更大规模的系外行星搜寻，2018 年 4 月，作为开普勒望远镜继任者的凌星法系外行星搜寻卫星 TESS (transiting exoplanet survey telescope) 发射升空[12]，计划对全天进行系外行星的搜寻与研究。截止到 2020 年 11 月 10 日，通过采用不同的探测仪器与方法，天文学家共发现并确认了 4 301 颗系外行星[13] (如图 1 所示)。



注：图中红色表示视向速度法发现的系外行星，绿色表示凌星法，紫色表示微引力透镜法，蓝色表示直接成像法，灰色表示天体测量法。

图 1　截止到 2020 年 11 月 10 日，每年发现并确认的系外行星数量分布[13]

2　系外行星探测方法

系外行星探测方法可分为直接探测法和间接探测法两类。由于系外行星十分暗弱，使用直接探测法较难观测到，目前凌星法与视向速度法是最主要的两种间接探测法。联合分析系外行星凌星光变曲线与其主星光谱视向速度周期性变化[14, 15]，可以确定系外行星的许多参数，如质量、半径、轨道周期等，进一步推测行星的组成成分等性质，从而为类地行星和宜居带行星的研究提供基础。

2.1　系外行星的间接探测法

系外行星因为半径小，温度低，因此总的辐射很弱，且通常淹没在主星辐射中而难以分辨；而探测行星对主星的影响相较而言更容易。间接探测法是目前最高效、易行的系外行星探测手段，对于不同特性的系外行星也需要使用不同的探测方法。

2.1.1　天体测量法(astrometry method)

天体测量法是搜寻系外行星最古老的方法之一，它通过监测系外行星的引力作用所造成主星位置的变化来探测系外行星。19 世纪中叶前，天文学研究大多是围绕天体力学和天体测量学开展，通过分析主星在围绕整个系统的质心公转过程中相对背景恒星的周期性位置变化，得出行星质量、轨道等基本参数。使用天体测量学的方法寻找伴星或系外行星的方法最早可以追溯到 18 世纪后期，William Herschel 曾宣称发现蛇夫座 70 有一颗“看不见的伴星”，正是这颗伴星使其位置发生周期性的改变。半个世纪后，Thomas Jefferson 对这颗伴星的直径和轨道进行了计算，并怀疑这是一颗系外行星。20 世纪末通过采用光谱

视向速度法进行分析，这颗“看不见的伴星”才被确认不是系外行星，而是一颗双星[16]。2010 年，Muterspaugh 等人通过 PHASES 系统 (Palomar high-precision astrometric search for exoplanet systems) 对 51 个亚角秒双星进行了较差位置监测，从中发现并确认了第一颗天体测量法发现的系外行星 HD 176051 b，其质量为 $1.5M_{\rm J}$ ($M_{\rm J}$ 表示木星质量)，轨道周期约 1 016 d[17]。截止到 2020 年 11 月 10 日，使用天体测量法发现的系外行星共 12 颗[18]。随着天体物理研究、天文观测技术与方法不断发展，人们尝试使用一些其他效率较高的探测系外行星的方法，利用天体测量法可以更精确地测定系外行星的质量与轨道参数，尤其是长周期行星[19, 20]。目前正在运行的卫星 Gaia 将在 2020 年 12 月 3 日释放 DR3 数据，届时我们有可能从中发现更多长周期的类木行星。位于行星系统外侧的长周期类木行星，为内侧宜居带轨道的类地行星的存在提供了保护作用，深入研究长周期类木行星所在的行星系统，将为我们提供更多研究宜居带类地行星形成与演化的线索[21]。

2.1.2 视向速度法 (radial velocity method)

随着光谱观测仪器与分析方法的不断发展，20 世纪 90 年代，人们发现了新的探测系外行星的方法：由于系外行星的引力作用，主星会围绕系统质心进行小幅度的公转，当主星在视线方向朝地球运动时，主星光谱中的谱线会发生蓝移；而主星向远离地球的方向运动时，谱线会发生红移。通过探测这种系外行星引起的多普勒效应的方法叫做视向速度法[22]。视向速度法探测的基本原理与天体测量法类似，都是间接地探测系外行星引起主星运动或位置的变化[7]。通过天体测量法监测主星由于行星引力造成的微小位置变化，效率远低于光谱视向速度监测，因此视向速度法在系外行星探测方面的应用更普遍。通常行星的质量远小于其主星质量，系外行星引起主星视向速度变化的振幅与行星-主星质量比的 2/3 次幂近似成正比[23]，由于当时光谱仪的分辨率有限，探测到的系外行星大多是热木星等大质量的系外行星。与地球质量相似的行星所引起太阳质量恒星的视向速度变化的振幅约为 9 cm/s，想要探测类地行星，光谱仪对于视向速度的测量精度至少要达到亚米级 (即小于 1 m/s)。

视向速度法探测系外行星受行星轨道倾角的限制，通过计算得到行星质量下限 $m\ \sin i$ (m 为行星质量，i 为行星轨道倾角)，并结合光变曲线计算 m。轨道倾角越小，视向速度变化幅度越小，越难以被探测到。行星微弱的信号容易受到主星色球活动和分光双星的干扰，通过对比主星光谱中 Ca II H 与 K 吸收线和 Fe 吸收线的视向速度变化，可以排除前两者的干扰[24]；系外行星引起主星视向速度变化只会引起谱线波长都发生红移或蓝移，根据视向速度变化的量级与所有谱线都发生同样的蓝移或红移，可以与分光双星区分开来。与其他方法相比，视向速度法也更适合探测长周期系外行星和多行星系统。

2.1.3 凌星法 (transit method)

凌星法是目前系外行星探测效率最高的方法。利用凌星法探测系外行星起源于食双星的观测，食双星系统在一个周期内一般可以观测到两个掩食：(1) 主掩食，食双星系统中的较暗恒星掩食较亮恒星，双星系统总光度下降幅度较大；(2) 次掩食，食双星系统中较亮恒星掩食较暗恒星，双星系统总光度下降幅度较小。系外行星凌星也与食双星类似，当系外行星从地球与其主星之间的连线附近经过时，地球上可以探测到主星因为行星掩食造成的光

度下降，这种探测方法称为凌星法。由于系外行星本身并不发光，体积和质量比主星小很多，极其暗弱，在发生掩食时，造成光度下降的幅度与自身直径相对于主星直径的大小有关，行星相对主星的直径越大，凌星时造成的光度变化就越明显。对发生凌星的主星进行测光观测，即可获得“U”型或“V”型的光变曲线。这种方法简单易行，对仪器的测光精度要求相对较低，非常适合机动性较强的米级望远镜进行测光观测[25]。对可能发生系外行星凌星的目标源进行长时间的监测，获得相应的光变曲线后，如果可以解释凌星导致的光度下降现象，即可得到系外行星的部分基本参数，如行星的半径、轨道周期等[26]。但这种方法也存在以下局限性。

(1) 探测类地行星等直径较小的系外行星，对探测仪器的测光精度要求较高。系外行星凌星时的掩食深度直接决定了造成光度下降的幅度，与行星-主星视面积的比值近似成正比。仪器的测光精度决定了进行观测时可以分辨的最小光变幅度，只有系外行星的掩食造成的光度下降大于仪器的测光精度才能保证观测到系外行星候选体。对于地基望远镜，在有限的视宁度下使用凌星法观测系外行星，观测到的系外行星的最小体积受到了限制。

(2) 系外行星的判断结果容易受到食双星的干扰。目前食双星的主要探测方法与凌星法系外行星探测相同，通过监测两颗相互掩食的恒星的光变曲线，确认食双星系统并分析基本参数。食双星系统由两颗恒星构成，伴星无论是质量、体积与光度通常都大于系外行星，凌星时掩食深度大、每个周期的光变曲线大都存在明显的主掩食与次掩食阶段，而暗弱的系外行星往往没有可以观测到的次掩食，但某些食双星系统也可能存在亮度极暗的伴星，从而被误判为系外行星。凌星法筛选出的系外行星候选体，其误判率较高[27–29]，最准确的办法是结合视向速度观测，确定伴星质量，以筛除大部分食双星以及主星磁活动的干扰。在系外行星测光观测的数据处理中，需要分析以上干扰因素对观测目标造成影响的程度，通常要对目标星周围的近距离背景恒星和伴星的干扰进行分析[30]，如果背景恒星与目标视位置非常接近，背景恒星的光对目标星影响可能会淹没系外行星掩食的光变，难以准确地分析出系外行星的信号。

2.1.4　计时法 (timing variations method)

系外行星本身非常暗弱，对于地面上的望远镜来说，探测这些暗弱的目标十分困难。在望远镜探测精度和观测手段有限的年代，人们总能通过探测行星绕转对主星的影响来发现系外行星的踪迹。1992 年，人类通过脉冲星计时法 (pulsar timing variations) 发现了第一颗系外行星，并通过监测 PSR 1257+12 这颗毫秒脉冲星的多个周期，发现行星系统引起主星脉冲中心发生了“摇摆”一样的周期性变化[5]，这种方法称为脉冲星计时法。但根据模拟行星系统参数，这颗脉冲星的前身星爆炸时，其行星系统并不能保持稳定，这 3 颗行星可能是由前身星的伴星“汽化”形成[31]。使用这种方法发现的系外行星目前只有 7 颗，其中所有的主星质量都在 $1.35 \sim 1.4M_\odot$ ($M_\odot$ 表示太阳质量)范围内[13]。

部分系外行星围绕食双星公转，行星的引力会拖拽双星系统，造成互相绕转的两颗子星掩食周期发生提前或推迟的周期性变化和掩食持续时间变化的现象[32]，这种方法称为食双星计时法 (eclipse timing variations, ETV)。目前已发现围绕食双星公转的系外行星共 16 颗[13]。围绕食双星公转的系外行星大致分三类：(1) S 型，围绕双星中的一颗恒星公转；(2)

P 型，围绕整个食双星系统公转；(3) T 型，行星轨道接近双星系统的 L4 与 L5 拉格朗日点 (特洛伊行星)[33]。当行星与双星系统之间由于潮汐力影响存在共振时，尤其是质量较低的食双星系统，掩食时间变化更明显。开普勒望远镜与 Corot 卫星的数据也验证了这些观点，但目前发现的这类系外行星都具有非常长的轨道周期，从几百天到几千天不等。如开普勒望远镜发现的第一颗围绕双星公转的 P 型系外行星 Kepler-16 b[34]，是一颗周期 229 d 的行星。对于不同类型的围绕双星公转的系外行星，宜居带位置也有很大差别：对于 S 型系外行星，标准的宜居带理论是适用的；但对于 P 型系外行星，宜居带的位置可能在土星轨道外[35]。

在多行星系统中，系外行星的引力除了会引起主星视向速度的变化，也会引起其他行星公转周期的变化，这种现象被称作凌星计时法 (transit timing variation, TTV)[36, 37]。以具有两颗行星的行星系统为例，行星之间的引力摄动互相影响，围绕主星公转的速度变得不均匀，一颗行星的凌星时间比预计的时间提前，另一颗的凌星时间就会推迟，反之亦然。根据 TTV 现象我们可以获得很多行星系统的参数，如偏心率[38]等。一些特殊的多行星系统中，行星之间存在轨道共振，研究这类行星的 TTV 现象将会有利于理解气态巨行星从雪线外向内迁移过程中行星-尘埃盘间的相互作用[39]。

行星的潮汐力会导致主星脉动周期发生变化[40]，通过探测这种变化进行研究系外行星的方法称为脉动周期计时法 (pulsation timing variations)。使用这种方法的前提是恒星的脉动周期稳定，而且对 A 型星周围的亚恒星伴星更敏感。2016 年开普勒望远镜发现了一颗周期为 840 d 左右且位于宜居带内的类木星 KIC7917485 b[41]，其主星是一颗 A 型星，这是首次在 A 型星周围通过主星脉动变化发现的系外行星。目前通过这种方法发现的系外行星共 2 颗[13]，均为绕主星宽轨道公转的亚恒星级行星。

2.1.5 *微引力透镜法* (gravitational microlensing method)

1936 年，爱因斯坦[42]根据广义相对论提出，引力场源后面的天体发出的电磁辐射会由于引力场的作用产生汇聚或多重成像效应。这种遥远天体的光由于受到大质量星系、恒星或黑洞的引力偏折，使成像发生畸变的现象，在 1979 年首次被观测并证实[43]。1991 年，Mao 与 Paczynski[44] 提出了微引力透镜探测双星与系外行星系统的方法，在双星互相绕转或行星系统围绕主星公转的过程中，当两者之间的距离与爱因斯坦环半径相当时，双星系统或行星系统作为引力透镜，会使遥远背景恒星的光发生偏折，形成强引力透镜成像。行星系统质量远小于黑洞、星系，其产生的强引力透镜成像与作为引力透镜的前景恒星距离较小而难以区分，但两者的总亮度亮于前景恒星自身，这种现象被称为微引力透镜。在遥远星体透过双星系统或行星系统发生微引力成像时，会观测到前景双星系统或恒星的光度发生了小幅度的上升，这种方法很适合探测一些质量小、直径小的双星或系外行星，以及一些没有固定轨道的“流浪行星”[45]。截止到 2020 年 11 月 10 日，通过微引力透镜法发现的系外行星共 105 颗[13]。

2.1.6 *轨道亮度调制法* (orbital brightness modulations method)

距离主星极近轨道的系外行星接收的主星辐射更多，系外行星围绕主星公转时，由于视向速度的影响，有可能导致在非掩食的时刻主星亮度增加 (或下降) 的现象 (也称作多普勒增

亮)，这种方法称为轨道亮度调制法[46] (见图 2)。目前通过这种方法发现的系外行星共 6 颗，均由开普勒望远镜发现。这种相位变化引起的亮度变化通常很微弱，一般只有距离主星极近的行星才可能出现，需要灵敏度与测光精度很高的仪器才可能观测到，因此这种方法更适合天基系外行星搜寻。

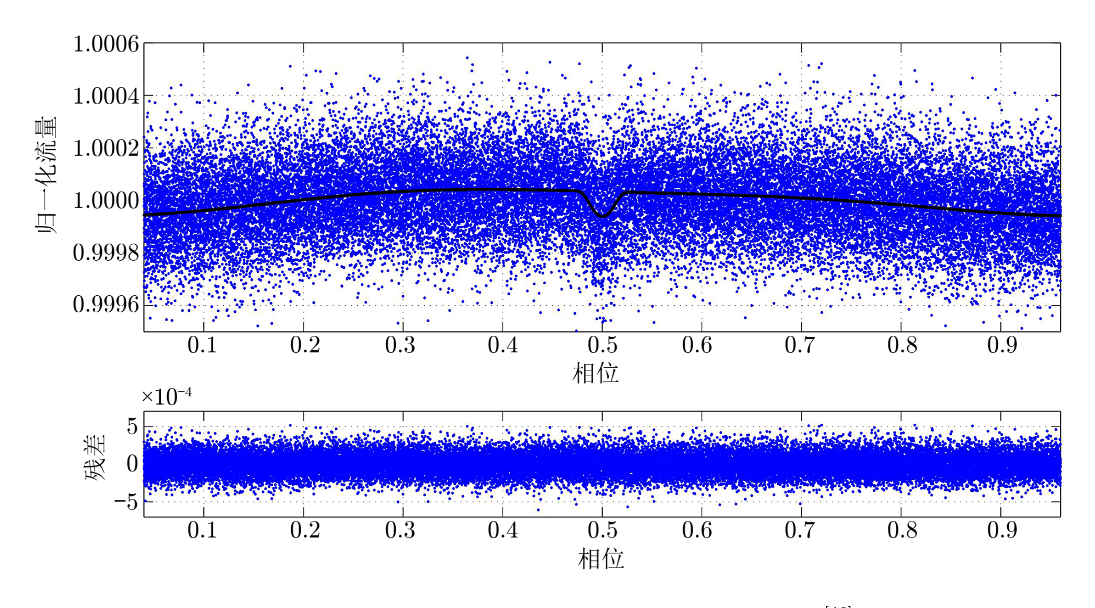


图 2 Kepler-76 b 非掩食时刻的流量随相位发生变化[46]

行星大气层的维持依赖于行星引力对气体分子的吸引，但绝大部分类地行星等岩质行星质量很小，这些类地行星的引力使它们很难具有厚大气层，轨道亮度调制法可以对巨行星的大气层动态进行深入的研究[47]。2021 年计划发射的 JWST 空间望远镜 (James Webb Space Telescope)[48] 也将观测一些已知系外行星的大气层，届时 JWST 的观测成果可能会开启系外行星大气研究的新时代。

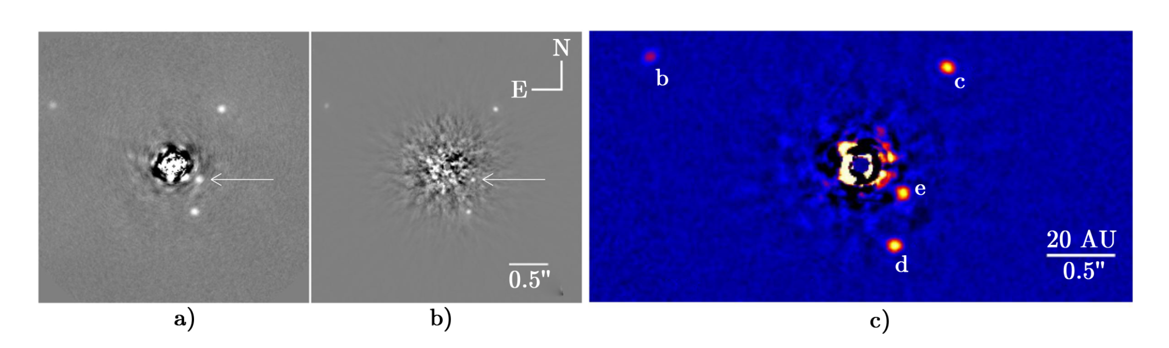
2.1.7 *行星盘运动法* (disk kinematics method)

根据现有理论与观测的相互验证，目前我们基本认为系外行星是在原行星盘中不断吸积其中的尘埃而形成。通过亚毫米波阵列探测或自适应光学观测，可以探测到行星盘的亚结构，如行星盘中的环、空隙，螺旋结构，不共面的内行星盘的阴影等。阿塔卡马大型毫米/亚毫米波阵 (Atacama large millimiter/submillimeter array, ALMA) 正在开展长期的原行星盘及其演化的观测。2015 年，ALMA 观测 HL Tau 区域的原行星盘并获得了高分辨率图像，首次使用分子谱线观测到原行星盘的运动。在清晰可辨的几个 AU 大小的原行星盘中，显示出明暗交替的环，暗环并不是完全的空隙，其中存在生长中的原行星。通过分析环的偏心率和共振，有充分的证据说明这些暗环就是行星形成过程中所产生的空隙[49]。后期通过模拟盘中气体和尘埃的二维演化模型也验证了 HL Tau 中的空隙很可能是由行星-盘之间的相互作用所产生[50]。在 2019 年，ALMA 发现了一颗在原行星盘中“切割”出空隙的系外行星 HD 97048 b[51]，通过观测行星盘中 CO 吸收线的强度，ALMA 在距离 HD 97048 这

颗恒星 130 AU 的位置探测到了一个尘埃气体带的空隙，同时气体按开普勒定律的流动方式受到了干扰，因此莫纳什大学的 Pinte 等人判定这些现象是由一颗系外行星所导致，而且可以根据这些观测证据发现系外行星的存在。这颗系外行星是一颗类木星，截止到 2020 年 11 月 10 日，这种方法发现的系外行星仅此一颗，但未来有更多行星盘中的系外行星可以在亚毫米波进行探测。

2.2 系外行星的直接探测法

在 20 世纪 90 年代，10 m 级望远镜的落成与空间望远镜的发射极大地提高了天文光学观测的深度与精度，许多大望远镜开始尝试直接对系外行星进行搜寻与观测。2008 年，Keck 望远镜对系外行星系统 HR 8799 进行了直接观测 (directly imaging)，发现了 b, c, d 共 3 颗行星并拍摄了图像，这也是人类历史上获得的第一张多行星系统的图像[52]；2010 年，Keck 发现了这个行星系统的第 4 颗行星 e[53] (见图 3)。系外行星直接成像观测对于分辨率有很高的要求，通过自适应光学、星冕仪等高分辨率成像技术才能够实现：安装在南双子望远镜 (Gemini South telescope) 上的 GPI 终端 (Gemini planet imager) 使用近红外波段对系外行星进行高精度直接成像观测，极限星等 H=20 mag，在自适应光学成像方面具有极高的成像对比度和低延迟；配备的 Lyot 星冕仪也可以深度观测系外行星的更多特征[54]。在空间光学望远镜上安装星冕仪对系外行星直接成像可以大幅降低对望远镜口径的要求，未来中国空间站望远镜 CSST (China Space Station Telescope) 将配备星冕仪对已知雪线附近的系外行星进行研究。与间接探测方法相比，直接成像可以获得更丰富、更准确的系外行星的特征，目前通过直接成像发现的系外行星共 51 颗[13]。



注：a) 为 2010 年 7 月 21 日 L 波段的成像；b) 为 2010 年 7 月 13 日 K_s 波段的成像；c) 为 2009 年 11 月 1 日 L 波段的成像。

图 3 Keck 望远镜对 HR 8799 行星系统的 4 颗行星 b, c, d, e 的直接成像[53]

3 系外行星研究

系外行星的探测是由恒星活动监测衍生而来。在系外行星研究的近 30 年内，尽管已发现的系外行星数量有限，通过利用这几千颗系外行星的观测数据，前人已经开展了一些系外

行星的理论研究、参数分析以及性质研究等工作[55−57]。由于系外行星探测比较困难、样本量有限，目前系外行星系统性的研究成果相对欠缺。随着太阳系内行星科学的进步与观测精度提高，人们发现了越来越多的系外行星，系外行星的探测研究也从恒星科学的“副产品”，逐渐成为独立的研究方向。

3.1 系外行星候选体的后随观测与证认

系外行星最初的探测手段主要是光谱视向速度法，在 20 世纪 90 年代，光谱观测的视向速度精度只能探测类木行星，随着光谱仪的稳定性与探测精度不断提升，通过地基高精度视向速度观测，人们发现了更多的超级地球和类地行星。在 2000 年之后，人们则主要采用凌星法来发现系外行星。对于系外行星的地基后随观测，现在正处于一个由搜寻观测向行星的精细观测转变的过渡阶段：在天基望远镜发现系外行星候选体后，地基望远镜根据探测能力、精度、可观测条件等选择适合自身观测的目标进行长期监测。目前采用凌星法和视向速度法发现系外行星的效率最高，第 2 章已经详细介绍了这两种方法。单独通过一种方法探测系外行星都存在局限性，如不能完全确认其是系外行星，或者获得的基本参数不够全面。望远镜探测到类似系外行星凌星的信号，都存在受到变星、主星周期光变和仪器噪声的干扰等情况，因此在分析数据之前需要判断候选体是否为系外行星。随着系外行星观测数据的分析方法不断改进，系外行星凌星信号的识别精度也逐渐提高，但仍然无法保证 100% 的准确性，在系外行星进行参数分析之前，证认候选体[15, 24] 是否为系外行星可以提高数据分析的效率。证认系外行星候选体可以通过传统的光谱、测光数据联合分析，从而排除干扰项。

目前主流的系外行星性质研究方法中，联合分析测光数据与光谱数据可以高效、精确地测定系外行星绝大部分基本参数，并排除单一观测方法的不确定性。目前已有一些软件可以实现测光数据与光谱数据的联合分析，如 Juliet[58] 软件可以分别分析和拟合来自多个设备的测光数据与光谱数据，也可以联合分析测光数据与光谱数据；对于多行星系统，无论是否存在凌星，都可以使用 Juliet 进行分析。

开普勒、TESS 等空间望远镜的观测不受观测环境的限制，便于探测更多未知的系外行星候选体，但地基小望远镜在后随观测的机动性，可以灵活调用的观测时间和建造成本等方面优于空间望远镜，因此地基望远镜对系外行星候选体的长期监测与深度研究非常必要。根据这些系外行星候选体的相关研究成果，天文学家已经发表了几百篇论文，这些天文学家大多采用了后随测光观测、光谱观测的方式来获取更多系外行星的信息。TESS 探测到的大部分系外行星候选体和其他地基系外行星巡天项目探测到的系外行星，亮度大多亮于 12 mag，目前很多地基小口径望远镜可以实现毫星等精度的测光观测，因此口径小于 2 m 的地基小望远镜也可以对这些目标进行高精度的后随测光观测。在 TESS 发射后的 5 ~ 10 a 内，地基小口径望远镜将成为系外行星测光后随观测的主力设备，小望远镜后随测光观测模式主要为以下 3 种：

(1) 单台小望远镜观测，其特点为机动性强，可以随时快速切换观测目标，观测的顺序与策略也可以灵活调整；

(2) 小望远镜阵列协同观测，其特点为在单台小望远镜观测的基础上，提高时间分

辨率；

(3) 多台址小望远镜协同观测，其特点为覆盖多时区、多个台址的小望远镜进行接力观测，确保系外行星监测的连贯性。

在以上三种观测模式的基础上，进行系外行星凌星的多波段测光观测，研究不同波段凌星时光度下降程度的区别，可进一步确认是否为系外行星，通过近红外波段观测凌星或次掩食可以研究行星的大气性质。观测系外行星不同相位的光谱，可对其进行证认与多方面的分析。

(1) 观测系外行星在不同相位时主星的中低分辨率光谱，分析吸收谱线的强度变化，研究系外行星大气成分与性质。

(2) 观测系外行星不同相位时主星的高分辨率光谱，分析计算系外行星引起的主星视向速度变化，得到系外行星的基本参数。

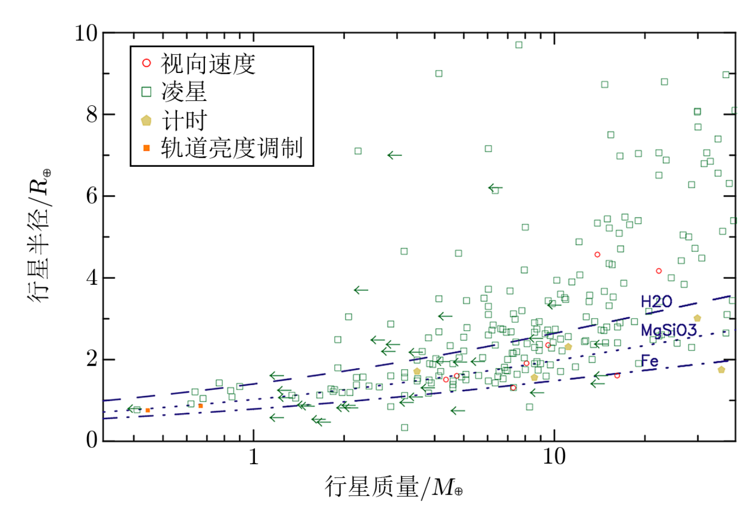
(3) 主星高分辨率光谱还可能包含系外行星大气的发射谱。对于一些具有厚大气层而且距离主星很近的系外行星，如热木星，在主星的强辐射下可能会激发行星大气产生发射谱[59]。通过分析行星发出的热辐射和反射主星的辐射，了解行星大气层的成分与性质，同时行星大气发射谱线也会反映主星发生的活动，可进一步研究行星与主星间的相互影响。

除了对已知公转周期的系外行星候选体进行证认之外，TESS 的系外行星候选体中还有许多只观测到一次掩食的目标[60]，它们的周期尚不明确，在这些目标中，有可能存在超长周期的系外行星，或者某些特殊的变星，如激变变星。这一类系外行星候选体的证认与周期明确的目标相比，需要更多的观测时间，在目前已确认的系外行星中，周期较长的目标的研究还有很多空白，而且周期误差较大，发现新的长周期系外行星目标对于研究长周期系外行星很有必要，长周期系外行星的主星可能还拥有其他系外行星。对于太阳系的起源我们尚无定论，如果能找到与太阳系类似的行星系统，对于行星的形成与演化会有新的发现。在证认、分析系外行星候选体的数据时，我们从中发现特殊变星的可能性更大。对于掩食深度较小、公转周期较长的系外行星的证认观测，通常需要望远镜长时间运行。对于 TESS 发现的系外行星候选体，75% 的候选体亮度高于 12 mag，使用口径在 50 cm 以下的天文望远镜也可以实现 TESS 系外行星候选体的后随观测。与科研级别的天文望远镜相比，这些业余天文望远镜的观测时间更充裕，机动性也更高，将这些观测资源充分利用起来，可以提高系外行星证认的效率。

3.2 类地行星的探测与性质研究

类地行星通常指质量与地球接近，且半径为 $0.8R_{\oplus} \sim 1.25R_{\oplus}$ ($R_{\oplus}$ 表示地球半径) 的岩质行星，而半径在 $1.25R_{\oplus} \sim 2R_{\oplus}$ 范围的系外行星被称为“超级地球”，目前已发现的类地行星中，绝大多数行星的密度与地球相似 (见图 4)。2011 年 Wordsworth 等人采用视向速度法发现了第一颗位于宜居带内的系外行星 Gliese 581 d，其质量约为 $5.6M_{\oplus} \sim 7.1M_{\oplus}$，围绕一颗 M 型矮星公转，接收到来自主星的辐射低于火星的 35%。通过模拟 10^6 Pa 压力 CO_2 和其他背景气体 (如 N_2) 的不同浓度，这颗行星的表面温度都在 0°C 以上，即这颗行星位于宜居带内[61]。宜居带意味着此处的恒星辐射强度适中，行星表面温度可以存在液态水，这

是生命存在的必要条件，人们对于宜居带的认识也从单一考虑主星的距离变成考虑更多角度，如大气成分等[62]，寻找这个区域内的行星也是寻找人类第二家园与地外文明的第一步。搜寻类地行星对望远镜的探测精度提出了极高的要求，空间探测技术的成熟为类地行星研究带来了新的机遇。在开普勒望远镜发射之后，从其发现的系外行星中发现了大量半径小于 $4R_\oplus$ 的系外行星，以开普勒发现的第一颗宜居带类地行星 Kepler-22 b 为例，该行星的半径约 $2.4R_\oplus$，虽然没有足够的证据证明这是一颗岩质行星，但其主星是一颗质量为 $0.97M_\odot$ 的 G5 型矮星，在辐射平衡下的行星表面温度约为 262 K，与地球极其相似[63]。其后又发现了质量为 $1.1M_\oplus$ 的行星 Kepler-186 f，位于一颗 M1 型星的宜居带内[64]。



注：截止到 2020 年 11 月 10 日已探测到的系外行星质量-半径统计情况，绝大部分类地行星的密度都在 H_2O 和 Fe 密度之间（“-” 状虚线），其中很多行星密度都与地球相近（“.” 状虚线，岩石主要化学成分为 $MgSiO_3$）。

图 4　系外行星质量-半径统计情况[13]

在 TESS 接替开普勒望远镜的系外行星搜寻任务后，同样也发现了大量类地行星与超级地球。TESS 发现的第一颗系外行星 π Men b，其半径约为 $2R_\oplus$ 的超级地球[26, 65]，其主星亮度 V=5.9 mag，因此非常适合人们进一步研究它的大气和动力学特性。后续发现的行星 TOI-700 d 位于宜居带内，与地球质量相当，围绕一颗 M 型矮星公转[66]。随着系外行星探测的开展与后续高效的后随观测研究，我们将有机会发现更多宜居带内的类地行星，从而深入了解地球的起源。

目前发现的系外行星很多都是多行星系统，通过参考太阳系本身，我们可以合理地推测，多行星系统的恒星是普遍存在的。参考目前的行星形成与演化理论，一个行星系统内同时存在类木行星和类地行星，类木行星由于质量、体积较大，因此更容易被探测到；而一个系统内的行星之间存在引力相互影响，这种影响可能会造成行星掩食中心时刻的周期性变化，因此通过监测凌星时间变化可以发现更多已知行星系统中的类地行星[36]。这种方法已经得到了广泛应用，以 TOI-141 为例，这是一个具有不同轨道倾角的多行星系统[67]，TESS 观测到 TOI-141 b 的凌星现象，通过地基进一步的光谱后随观测，发现这个行星系统还存

在另一颗行星——TOI-141 c。通过光谱视向速度法得出了 TOI-141 c 的基本参数与轨道周期，在行星 c 对应的凌星时刻没有观测到凌星现象，表明 b, c 两颗系外行星的轨道不共面。

3.3 巨行星及其大气的研究

巨行星一般指质量大于 $10M_{\oplus}$ 的行星，主要由液态或固态气体组成，根据质量与半径的大小分为类木行星与类海王行星两类，其中类木行星的半径通常在 $6R_{\oplus}$ 以上，类海王星半径在 $2R_{\oplus} \sim 6R_{\oplus}$ 之间。这两类行星由于体积和质量都很大，探测精度要求低于类地行星，在已探明质量的系外行星中约占 80% 以上。这类行星最重要的特征是有厚大气层，而且通常观测结果表明热木星的半径大于通过模拟其内部结构得出的半径；其中还有相当大一部分热木星的轨道偏心率远大于太阳系行星的偏心率，这可能与热木星在形成初期具有较高的轨道偏心率和轨道倾角有关，在引力摄动的影响下逐渐向内部迁移，在距离主星极近的轨道上行星系统达到了稳态[68]，同时这类热木星也更多出现在温度更高的主星附近[69]。对于类木行星的性质分析有可能使我们避免太阳系先入为主的影响，得出更具有普适性的行星形成与演化理论。

目前已发现的类木行星、类海王行星中有很大一部分是距离主星距离很近、周期较短的热木星和热海王星。由于受到主星强烈的辐射，热木星的温度很高，某些温度极高的热木星甚至出现了与矮星相似的特性，处于同样位置的热木星出现的温度差异来自不同的大气层结构，温度较高 (大约 2 000 K 以上) 的“pM类”行星 (类似于恒星中的 M 型矮星——dM 类恒星) 大气中存在 TiO 和 VO 等分子；而温度较低的“pL类”行星 (类似于极冷矮星中的 dL 类恒星) 中 Ti 和 V 等元素只能存在于固体冷凝物中[70]。热木星通过反射主星辐射，自身辐射强度也很大，通过观测次掩食过程中红外波段的亮度变化探测是否存在热发射，再结合行星大气模型和黑体辐射假设来估算其有效温度，最后推断其辐射的能量来源[71]。主星强烈的辐射也会造成近轨行星大气膨胀并发生逃逸，对于行星的演化和其化学组成会产生显著影响[72]；在经历潮汐耗散、光致蒸发等原因导致物质损失，从而向内迁移的热木星、热海王星也被认为是 USP (ultra-short-period) 行星的起源[73]。

除了离主星极近的热木星，我们对于冷气态巨行星的研究还相对较少，因为它们周期较长，观测比较耗时而且难以获得比较全面的参数。但具有长周期、宽轨的气态巨行星的行星系统与太阳系十分类似，如 HR 8799 已发现的 4 颗行星，它们处在近似同心圆的轨道上，主星质量为 $4.9M_{\odot}$，而且几颗行星的性质可用大质量原行星盘演化模型很好地解释，这个行星系统看上去更像一个“放大版”的太阳系[52]。

3.4 系外行星性质统计与演化理论研究

随着多个系外行星巡天项目的开展，在接下来的几年内系外行星和系外行星候选体数量有望呈现数量级的增长，与过去在样本量非常有限、探测难度较大的情况下对少数确认的系外行星进行性质分析相比，未来的系外行星研究将会建立在充足的研究样本基础之上。除了对大样本系外行星进行证认与性质研究，统计分析样本的特性规律也值得重视。在系统分析这些系外行星候选体的性质、结构组成、质径比等参数的前提下，我们会发现更多系外行星之间的关联，从而改变目前参照太阳系行星的质量和半径对系外行星进行粗略定义的

现状。除了样本数量的扩充之外，人工智能等日渐成熟的新技术也可以帮助我们更高效准确地分析和归类系外行星。

现有观测方法发现的系外行星大多数的周期小于 30 d，其中周期小于 1 d 的行星约 100 余颗。USP 行星因为观测相对容易，现有研究成果比较丰富：它们大多距离主星非常近，温度很高，同时受到巨大的潮汐力，对于气态行星而言更容易膨胀和瓦解[74]。结合行星迁移理论，我们可以对行星系统的演化有更多了解。通过对开普勒望远镜发现的候选体进行统计研究，发现在靠近恒星的范围内缺少体积大或密度低的行星，而且行星半径的统计规律呈现“双峰”，在 $2R_\oplus$ 处的数量较少。利用流体动力学模型进行模拟发现，只有含 H 包层的小质量行星会受到光致蒸发的显著影响，H 包层的蒸发导致了半径 $2R_\oplus$ 的行星偏少，从而形成一个“半径低谷”。而短周期和 USP 行星的形成很可能来源于主星 X 射线和 EUV (extreme ultra-violet) 辐照导致的小质量行星物质蒸发[75]。通过 MESA 的双星演化模型对主星为类太阳恒星、接近洛希极限的热木星进行模拟，在潮汐耗散的作用下完成轨道初始衰减后，剩下的行星由岩石内核和一些包络物组成，这些物质也会在光致蒸发的作用下逐渐减少，其性质与观测到的许多超级地球和亚海王星类似[76]。但行星的质量分布几乎没有受到蒸发的影响，半径的双峰分布也与行星样本的初始特征有关，因为小质量的行星内核只能吸积较少的物质[77]。USP 行星也因受到主星磁场的影响而迁移至更靠内的轨道，主序前恒星的自转周期统计结果显示，质量越大的恒星自转越快，磁场强度也更高。通过统计自旋周期在 $1\sim10$ d 内的 F, G, K, M 矮星周围的亚海王星数量，发现它们是均匀分布的；而在自转周期较短的恒星周围，行星的数量较少，这是主星的磁层随主星自转的过程中切割了原行星盘所导致，而主星上的非同步潮汐平衡能将处于盘边缘的行星迁移至超短周期 (小于 1 d) 的位置，这也同样解释了为什么 USP 行星距离它们的长周期前身行星轨道距离更远，而且大多数具有 USP 行星的系统都是具有凌星的长周期行星[78, 79]。

研究多行星系统中的平运动共振[38, 39]，可以探究行星之间的相互作用对于行星系统稳态、行星轨道迁移和演化的影响。除了潮汐力的作用，巨行星的摄动也会引起系统内其他小质量行星发生轨道共振。通过对 Kepler-68 系统的 3 颗行星参数进行模拟，发现其中的巨行星如果以偏心轨道围绕主星公转，两颗内部的类地行星会形成 5:3 或 7:4 的共振系统，与实际观测结果相符。而且当巨行星质量大于 $5M_\mathrm{J}$ 时，靠近巨行星的轨道偏心率可能被激发至 0.2，否则类地行星会保持近圆轨道公转，巨行星的摄动最终会影响内部行星轨道迁移和演化[80]。在开普勒望远镜释放的约 4 300 颗系外行星候选体中，大约有 652 个双行星系统和 222 个三行星系统。分别统计上述双行星系统和三行星系统中的行星轨道周期比值，发现都存在 1.5 (3:2 和 3:2:1) 和 2.0 (2:1 和 4:2:1) 两个共振比峰值。对于双行星系统，主星在不同演化阶段时吸积率存在差异，通过模拟不同吸积率情况下的双行星系统轨道共振比发现，在吸积率 $\dot{M}=2\times10^{-8}\ M_\odot\cdot a^{-1}$ 时，主星处于演化早期，主要形成 3:2 共振；在演化晚期吸积率 $\dot{M}=0.1\times10^{-8}\ M_\odot\cdot a^{-1}$ 时，主要形成 2:1 共振。行星在发生 I 型迁移过程中会受到行星盘的阻尼作用，阻尼系数 $f_1\geqslant0.3$ 时，有利于 3:2 形成；$f_1\geqslant0.1$ 时，有利于 2:1 形成[81]。

除了利用动力学分析行星与主星的关系，统计各项参数对研究行星形成的影响同样重要。通过统计行星体积与主星金属丰度的关系，发现金属丰度高的恒星更可能存在气态巨

行星，随着行星体积的减小，主星金属丰度与行星体积间的相关性也更低，小体积行星的主星金属丰度范围更宽[82]。根据开普勒望远镜发现的系外行星的最新研究结果，与热木星相近的“热海王星”(周期短，大小接近海王星) 通常出现在富金属恒星附近，而且系统内仅有一颗行星；热木星与热海王星的相似之处也表明两者可能存在同样的迁移或形成过程[83]。行星的形成效率一定程度上也依赖于主星的金属丰度。通过统计不同金属丰度的恒星是否存在行星系统，发现行星出现几率随着主星金属丰度增加而增加；每颗恒星拥有的行星数量也可能与主星金属丰度相关，在 [Fe/H]⩾0.1 处单个系统内行星数达到峰值，但这个结论可能受到宽轨富金属巨行星的干扰 (近轨小行星更倾向于和宽轨巨行星共存于一个系统)[84]。通过统计开普勒望远镜发现的行星出现概率，发现其与主星有效温度 $T_{\rm eff}$ 在一定程度上有关联[85]。根据统计开普勒望远镜样本的主星有效温度与行星形成率的关系，其中 $T_{\rm eff}$ 低于 5 000 K 的晚型星约 75%，$T_{\rm eff}$ 高于 6 500 K 的早型星约 35%。晚型星平均每颗拥有约 2.8 颗行星，而早型星平均每颗拥有 1.8 颗行星；有效温度高的恒星 (大于 6 000 K) 行星轨道间倾角也比冷恒星的行星系统更大 (高出 $10^\circ\sim20^\circ$)。这两条规律变化趋势相似，表明两者可能同源[86]。目前我们对行星系统结构的研究，一般都是以太阳系为参考，通过统计开普勒望远镜已发现的系外行星轨道偏心率发现，大多系外行星公转轨道为近圆 (偏心率约 0.06，轨道面间倾角小于 3°)，与太阳系相似[87]。通过其他方法模拟不同的轨道倾角情况下行星系统的凌星可观测情况，结果发现倾角在几度之内的情况下与实际观测最符合，即大部分多行星系统都与太阳系一样平坦[88]。但在已发现的系外行星中还存在部分大偏心率、宽轨小质量行星等相对于太阳系更独特的系统[89]，它们可能处于向稳态系统演化的过程中，在能够分析它们的形成原理之前，我们仍需要继续发现更多系外行星。

4 系外行星探测项目

目前系外行星探测项目众多，如使用视向速度法探测系外行星的 HARPS (high accuracy radial elocity planet searcher)[90]、ESPRESSO (Echelle SPectrograph for rocky exoplanets and stable spectroscopic observations)[91, 92]与使用凌星法探测系外行星的 HAT (Hungarian-made automated telescope)[93, 94]和 WASP (wide angle search for planets)[95]；安装在 CFHT (Canada-France-Hawaii Telescope) 上的偏振高精度视向速度光谱仪 SPIRou (SPectropolarimetre InfraROUge)[96]；位于夏威夷的 Pan-STARRS (Panoramic Survey Telescope And Rapid Response System)[97, 98]。在类木星探测方面取得较多成果的地基探测项目主要是 KELT (Kilodegree Extremely Little Telescope)[25]、TrES (Trans-Atlantic exoplanet survey)[99]、正在运行的地基凌星巡天 NGTS (the next generation transit survey)[100]。另外，还有使用凌星法探测系外行星的开普勒望远镜[10, 101]、TESS[12] 望远镜等天基探测项目。本章将简单介绍其中部分项目的情况。

4.1 地基探测项目

4.1.1 HARPS

HARPS 高分辨率光纤光谱仪是为欧洲南方天文台 ESO (European Southern observatory) 位于智利 La Silla 的 3.6 m 望远镜设计的专门用于系外行星搜寻与研究的终端，工作波段为 380 ~ 690 nm，光谱分辨率 R=115 000[90]。通过将光谱仪放置在恒温的真空罐内，实现高精度的视向速度观测，探测系外行星并获得其基本物理参数。经过实测，HARPS 可以在几个小时之内保持 1 m/s 的视向速度精度[102]。2011 年，随着激光技术的发展，HARPS 配备了激光频率梳，视向速度测量精度好于 30 cm/s[103]。

对于可观测的有限系外行星样本，HARPS 对它们进行了两次筛选，确认新的热木星与其他类型行星，在新增的热木星系统寻找可能存在的其他行星。2003 年，HARPS 高分辨率光谱仪实现了初光，在短短 9 d 内，展示了出色的光学效率和精度。结合高效的数据处理流程，发现了基于该设备的第一颗系外行星候选体 HD 330075 b[104]，一颗 0.8$M_{\rm J}$ 的热木星。HARPS 在预先选定的非活动类太阳恒星样本中进行小于土星质量的系外行星搜寻，截止到 2020 年 11 月 10 日，HARPS 已经发现了 314 颗系外行星，其中类地行星和超级地球的数量约 70 颗[13]。

为了对 HARPS 观测系外行星获得的光谱进行高精度的定标，HAPRS 开发了复杂的数据处理软件 DRS (data reduction software)，可以实时处理不同模式下观测的光谱数据。DAS 软件可以用来初步确定未知视向速度目标的视向速度量级，对于需要高精度视向速度定标的目标，定标前要确认目标的视向速度在 2 km/s 之内。HARPS 的数据可以在 ESO 的官网上获取[105]。

2012 年，在 HARPS 的基础上，ESO 在位于西班牙加那利群岛的 La Palma 的 TNG 望远镜 (Telescopio Nazionale Galileo) 上配置了参数相同的光谱仪 HARPS-N，同样用来搜寻岩质类地行星[106]。截止到 2020 年 11 月 10 日，HARPS-N 已发现 35 颗系外行星，其中约 8 颗为超级地球[13]。

4.1.2 ESPRESSO

ESPRESSO 是安装在 VLT 望远镜 (very large telescope array)[107] 的 4 台 8.2 m 口径望远镜上的高分辨率阶梯光栅光谱仪[91, 92]，是专门用于寻找与研究岩质类地行星的设备。ESPRESSO 的工作波段为 380 ~ 788 nm，可以观测三种不同分辨率的光谱：中分辨率 (MR)R=60 000、高分辨率 (HR)R=134 000、极高分辨率 (UHR)R=200 000。ESPRESSO 在 2017 年 11 月实现初光。

ESPRESSO 能够对可能存在系外行星的目标进行高精度视向速度监测，可以进行多种模式的观测：单台望远镜高分辨率光谱观测 (HR)、单台望远镜极高分辨率光谱观测 (UHR) 和多台望远镜干涉中分辨率光谱观测 (MR)。在 HR 观测模式下，视向速度探测精度可以达到 10 cm/s (其他两种分辨率精度为 5 m/s)。在信噪比为 10 的情况下，曝光 20 min 的 V 波段极限星等为 16.3 mag。ESPRESSO 团队开发了数据处理软件[108]，可对其获得的光谱进行精确的处理和分析。ESPRESSO 主要搜寻类太阳恒星附近的岩质行星，鉴于 VLT 可

观测天区较大，ESPRESSO 也会对空间望远镜搜寻的候选体进行后随观测，并测定暗星附近的行星质量 (如开普勒望远镜发现的候选体)。此外，ESPRESSO 正在对系外行星大气层的透射光谱进行精细观测，极高的光谱分辨率和观测精度可以通过观测一次或几次凌星确定热木星大气中的水蒸气含量和金属元素含量，对热木星大气的观测有助于揭示恒星活动与行星大气加热过程之间的关系[109, 110]。未来 ESPRESSO 将结合 VLT 的高对比度成像仪 SPHERE 对系外行星开展更多深入观测，如探测行星反射光、行星盘散射光，以及寻找存在适合生命存在条件的行星[111, 112]。

4.1.3 WASP 和 HAT

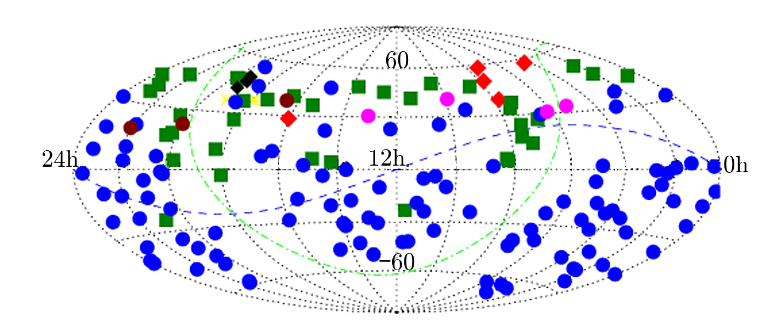
WASP 与 HAT是目前最成功的两个地基系外行星巡天项目。WASP 系外行星搜寻项目通过测光观测搜寻存在凌星现象的系外行星候选体，包括两台望远镜，分别坐落于西班牙 La Palma 岛和 Sutherland 的南非天文台[95]。巡天项目从 2003 年开始，在半年时间内就获得了 670 万条天体的光变曲线，可以在好于 1% 的精度内观测 V 星等为 7.0 ~ 11.5 mag 的目标，V 波段极限星等为 15 mag。为了快速获得大量观测数据，WASP 项目开发了观测软件 Talon 用来自动控制整个观测系统进行观测、控制 CCD 收集数据。2004 年，在 WASP 望远镜最初投入使用的 6 个月时间里，该仪器获得了包含 129 亿个数据点的 670 万颗恒星的光变曲线。WASP 系外行星的搜寻工作一直持续到 2013 年，11 年内共发现约 158 颗系外行星。

HAT 望远镜由位于北半球的 HATNet 与位于南半球的 HATSouth 组成。HATNet 系外行星巡天由分布在美国亚利桑那基特峰 (Kitt Peak) 与夏威夷两个站点的 7 台小望远镜 HAT 组成，通过测光观测发现凌星的系外行星，主要对北天区进行系外行星搜寻。两个观测站点间有 3 个时区的地理跨度，相比单一站点可以对更大范围的天区进行监测[93]。该系外行星巡天从 2003 年开始，目前共发现 70 颗系外行星，HATNet 团队也开发了复杂的算法用于识别出系外行星凌星的信号。HATSouth 巡天是在 HATNet 北天巡天的基础上，对南天区巡天的补充，共由分布在南美、澳大利亚与非洲的 6 台 HAT 望远镜组成，每台望远镜由口径为 0.18 m、焦比 $f/2.8$ 的主镜与 4 000×4 000 CCD 组成，视场为 $8.2^\circ\times8.2^\circ$[94]。从 2009 年初到现在共发现了 73 颗系外行星。

WASP 与 HAT 的发现扩充了系外行星的观测样本，由于仪器测光精度的限制，其中发现的大部分行星都是短周期 (小于 10 d) 的低密度气态巨行星[13]。这些行星大多是距离主星极近的热木星 (如图 5)[114, 115]，使我们对于这些不同于太阳系的行星系统有了全新的认识。这些行星通常具有厚大气层，主星亮度一般低于 12 mag，有利于地基长期观测研究、测定参数。在主星强烈的辐射下，我们可以观测它们的大气透射谱或发射谱[116, 117]，结合较为完备的物理参数拟合这些热木星的演化模型，将有利于进一步研究该类行星的形成与演化机制。

4.1.4 中国南极系外行星搜寻项目 (CHESPA)

自 2005 年中国首次抵达南极冰穹 A (dome A) 至今，已经安装了多台天文观测设备用于极地天文观测，冰穹A极佳的视宁度 (中值为 0.31″) 对于系外行星的长期监测非常有利[118]。中国科学院紫金山天文台利用位于冰穹 A 的 AST3 望远镜 (Antarctic survey telescopes



注：蓝色原圆点表示 WASP，绿色远点表示 HAT，褐色圆点表示视向速度法发现的系外行星，粉色表示 KELT，黑色方块表示开普勒望远镜，红色方块表示 XO，黄色方块表示 TrES。

图 5　系外行星搜寻项目发现的热木星位置分布[113]

times 3) 和 CSTAR (Chinese small telescope array) 牵头开展了中国南极系外行星搜寻项目 CHESPA (Chinese exoplanet searching program from Antarctica)[119−122]。CHESPA 的主要科学目标是在各种光谱型的恒星周围发现超级地球或海王星大小的凌星系外行星，这些恒星足够亮，可以确认径向速度并动态测量行星质量。经过 2016−2017 年间对 TESS 南天 CVZ 天区 (southern continuous viewing zone) 的搜索，CHESPA 发现了约 222 颗系外行星候选体，其中 116 颗是 TESS、Gaia 星表中确认的候选体。CHESPA 出色的观测能力和南极特殊的观测条件对于长周期系外行星的深入研究有重要的意义，发现的候选体也会为 TESS 后续的观测目标提供参考。

4.1.5　东亚系外行星搜寻合作 (EAPSNet)

在晚型 G 巨星周围搜寻太阳系外行星的东亚系外行星搜寻合作 (East-Asian planet search network)[123]，由中国科学院国家天文台与日本国立天文台、韩国天文与空间科学研究所、澳大利亚新南威尔士大学联合开展。此合作项目利用国家天文台兴隆观测站 2.16 m 望远镜、日本昴星团 8 m 望远镜、日本冈山天体物理观测站 1.88 m 望远镜、韩国 1.8 m 望远镜，澳大利亚 AAT3.9 m 望远镜，在 1 000 颗晚型 G, K 巨星周围预计搜寻到 50 ∼ 100 颗行星。这项合作项目对于加深理解行星演化理论、验证中等质量恒星的原恒星盘的稳定性时标非常重要。目前中国科学院国家天文台赵刚团队利用中国自主设计建造的设备 2.16 m 望远镜，已探测到首颗褐矮星和太阳系外行星[124, 125]。

4.2　空间探测项目

4.2.1　CoRoT 卫星

CoRoT (Convection, Rotation and Planetary Transits) 卫星发射于 2006 年，是由法国国家太空研究中心 CNES (Centre National d’Etudes Spatiales) 与欧洲太空总署 ESA (European Space Agency) 共同主导的空间探测卫星项目，主要的科学目标是星震学研究与系外行星搜寻[127]。CoRoT 卫星配备了一架 27 cm 口径的望远镜和广角 CCD，视场大小约 9 平方度，运行于低地球轨道 (low-Earth orbit)，探测的系外行星公转周期不超过 180 d，计划服役 3 a[126]，在经过两次延期运行后，卫星在 2012 年正式结束工作。

CoRoT 开拓了系外行星发现的新局面，通过凌星法高效地观测可能存在系外行星的目标，比地基望远镜观测具有更高的探测效率和测光精度。CoRoT 卫星主要的研究内容共三个部分：(1) 研究长周期系外行星在存在凌星的系外行星中的比例；(2) 探索距离主星极近的最小行星；(3) 将系外行星的主星类型扩大 (如年轻的大质量恒星等)。

CoRoT 卫星一次可以观测几千颗恒星，观测周期为 20 ~ 150 d，每一次观测中大约检测到 200 个凌星事件，但大多数是双星。在确认的系外行星中，人们有了突破性的发现[128]：发现的系外行星多数是周期小于 4 d 的热木星，如 CoRoT-1 b, CoRoT-2 b 等[129, 130]；首次探测到主星为褐矮星的行星 CoRoT-3 b, CoRoT-15 b[131, 132]；发现了第一颗超级地球 CoRoT-7 b[133]；发现了致密、高温的亚土星 CoRoT-8 b[134]。CoRoT 发现的系外行星大多是半径约为 $1R_{\rm J}$ ($R_{\rm J}$ 表示木星半径) 的气态行星，并在这些行星中发现了一些独特的性质：其中有 5 颗热木星的主星金属丰富极低，与通常视向速度发现的结果相反[135]；行星受主星辐照一面的温度只有很少的一部分传递给了背向主星的一面[136]。根据 CoRoT 观测的系外行星光变曲线，发现探测系外行星时的采样点数量严重影响着光变曲线形状，如果采样点较少，光变曲线畸形严重，对行星参数的分析会产生较大误差[137]。CoRoT 卫星在系外行星的探测研究方面开创了天基探测的先河，在服役的 6 a 中发现并确认系外行星共 33 颗。

4.2.2 开普勒空间望远镜

开普勒空间望远镜是美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 设计并于 2009 年发射的空间望远镜，用来搜寻系外行星，并对宇宙中系外行星的存在数量进行探测，是目前最成功的空间系外行星探测项目。开普勒望远镜的主镜口径为 1.4 m，视场约 115 平方度[10, 101]。在第一期观测任务中，开普勒对天鹅座附近的一个 115 平方度天区进行深度系外行星搜寻，监测了其中的 198 646 颗恒星[138]。在 2013 年，由于航天器上两个控制姿态的陀螺仪损坏，望远镜无法像以前一样调整俯仰姿态。开普勒望远镜一期巡天结束后，接着开展了计划外的巡天项目——K2 [138]。与 2013 年以前的科学目标有所不同，K2 除了对黄道上的几个天区继续进行深场系外行星搜寻，还开展了更多目标的观测：星系、亮星、超新星、年轻的疏散星团与星震学研究。开普勒是目前最成功的系外行星搜寻项目，在 2018 年巡天结束时，开普勒一期巡天与 K2 巡天共发现了 6 064 颗系外行星候选体，其中确认了 2 746 颗系外行星。在开普勒一期巡天发现的候选体中，半径小于 $2R_{\oplus}$ 的岩质行星约占 50%[13]，人们首次发现了一些与地球相似的行星，如 Kepler-186 f[64] 等。开普勒望远镜发现的候选体补充了之前由于探测精度限制造成的小体积系外行星样本的不足，通过统计分析开普勒望远镜的行星样本的半径、轨道倾角、轨道周期等参数，发现了许多重要的规律：大多数多行星系统都是共面的近圆轨道，与太阳系相似[87, 88]；行星的形成率与主星的有效温度、金属丰度等有一定程度的关联[84–86]；行星半径的分布情况也揭示了 USP 等短周期行星的来源[75]。开普勒望远镜样本中还存在许多位于类太阳恒星宜居带内的类地行星，说明与太阳系类似的行星系统在银河系中可能是相对普遍的。多行星系统中轨道共振现象的存在也很普遍，主星在不同演化阶段也会造成行星系统形成不同的共振比，这表明除了行星之间相互的引力影响之外，主星对于行星系统演化也起到了重要影响[80, 81]。开普勒望远镜还发现了约 14 颗围绕双星公转的 P 型行星[13]，这类行星通常由于双星掩食的干扰难

以探测到，而宇宙中存在大量双星，已发现存在行星的双星比例远小于双星在恒星中的占比。已发现的环双星行星多为低密度的气态巨行星，受到的主星辐射也会因为主星的轨道运动发生较大的多周期变化，根据观测数据估计，银河系中约有 1% 的密近双星具有行星，但它们的轨道和物理参数范围有待进一步研究[139]。开普勒望远镜向我们展示了银河系中存在大量系外行星，甚至比恒星的数量还要多，其中大部分是类似地球一样较小的行星[101]。

作为人类探索系外行星的路线中重要的一环，开普勒望远镜获得了大量的系外行星观测数据，这些数据也将作为 2021 年发射的 JWST 空间望远镜筛选观测目标的重要依据。由于凌星法极易受到周期性变星的干扰，开普勒望远镜筛选的候选体的假阳性很高[27]。由于开普勒望远镜发现的候选体主星亮度大多在 13 ~ 17 mag 之间[13]，大部分系外行星候选体过于暗弱，从而不适合地面的后随观测。

4.2.3　TESS 卫星

凌星法系外行星搜寻卫星 TESS (transiting exoplanet survey telescope) 是 NASA 于 2018 年 4 月发射的空间望远镜。望远镜主体由 4 台 10 cm 口径的望远镜组成，每台望远镜视场为 24°×24°，4 台望远镜垂直于黄道拼接为 24°×96° 的宽视场。TESS 计划开展全天范围的系外行星搜寻，将全天分为 26 个天区，黄道南北各 13 个天区，每个天区以南黄极或北黄极为一端，从南黄极或北黄极覆盖到黄道附近。TESS 卫星每 27 d 观测一个天区，因此 TESS 提供的系外行星候选体轨道周期大多数在 27 d 之内。由于每个天区以黄极为端点，相互之间存在重叠，在这些重叠的区域有机会发现周期大于 27 d 的长周期系外行星[12]。通过使用蒙特卡罗方法，根据太阳附近恒星类型分布和开普勒望远镜的观测数据模拟行星的出现概率，TESS 计划对至少 20 万颗 F, G, K, M 型星进行系外行星凌星信号的监测，其中将重点监测M 型矮星的恒星活动与其行星，因为这些较冷暗的恒星周围更有可能存在位于宜居带内的小质量行星[29]。这些恒星组成了 TESS 的观测目录 TIC (TESS input catalog)[140]。TESS 探测到的系外行星候选体中，经过 TESS 科学委员会的筛选，少部分适合地面后随观测或者 TESS 长期监测，这些令人感兴趣的候选体 (部分为已知系外行星) 组成了 TOI (TESS objects of interest) 星表[141]，这些特殊的系外行星候选体是接下来几年内系外行星研究的热点目标。

TESS 第一期巡天于 2020 年 7 月结束，已发现约 2 000 颗系外行星候选体，其中 556 颗半径小于 $2R_{\oplus}$[29]；通过分析曝光 30 min 的 FFI (full-frame image)，TESS 可能额外发现约 3 100 颗系外行星和约 10 000 围绕暗星公转的系外行星[142]。截止到 2020 年 11 月 10 日，TESS 已完成观测全天 26 个天区，发现系外行星候选体 2 174 颗，其中 67 颗已确认为系外行星、半径小于 $4R_{\oplus}$ 的候选体 704 颗[143]。在一期任务结束后，TESS 还将开展 3 期后续的系外行星探测任务[144]，每年预计发现 2 000 颗新的系外行星。在 TESS 望远镜上，指向黄极的 3 号 CCD 将会发现更多围绕 F, G, K 型星，并且受到来自主星辐照较为温和的长周期系外行星。TESS 作为高效巡天的空间望远镜，也正在开展除系外行星探测的其他研究，如：对望远镜发射前模拟的指向抖动引起的光子噪声模型进行更新，在 Gaia 释放的星表基础上精确确定恒星参数，改良目前根据经验得来的多行星系统模型，确定一种筛选适合曝光 2 min 目标的实际方法和通过图像几何畸变确定目标所在天区的实际模型[145]。

4.2.4 Gaia 卫星

Gaia 卫星作为 ESA 最重要的两个空间任务之一，旨在以最高的位置精度对银河系和本星系群中约 10 亿个恒星的位置、距离和运动进行“普查”。Gaia 对每颗恒星平均观测 70 次，利用获得的高精度位置数据绘制整个银河系天体的精确三维图，并记录它们的运动，从而揭示银河系的起源和演化。Gaia 观测的样本中有很多系外行星候选体，重复多次的观测方式有助于凌星的搜寻和深入研究；利用 Gaia 的观测数据可以较为精确地获得它们的质量，或者发现更多长周期的系外行星。Gaia 的样本是在银河系中均匀抽取的，这意味着其中很多类木星样本是距离主星较远的长周期行星，多行星系统中的外部巨行星对内部宜居带行星有保护作用，因此他它们是未来寻找宜居带类地行星的重要目标[21, 146]。

5 总结与展望

5.1 总结

本文主要对系外行星的探测方法和研究现状进行了介绍。从 1992 年发现第一颗系外行星到现在的近 30 年内，探测与研究方法目前已经发展较为成熟。已经有两类共计 11 种方法可用于探测不同种类的系外行星。通过凌星法与视向速度法，我们发现并确认了大量近邻宇宙中的系外行星，通过结合多种探测方法获得的信息与主星的参数和性质，对这些系外行星的特性进行了初步研究。目前已发现的系外行星中，周期小于 30 d 的短周期行星约占 75%[13]，其中一些为多行星系统，与太阳系十分相似，未来可以在这些样本中寻找宜居带内的类地行星。目前发现的巨行星中，很大一部分是热木星与热海王星，对于它们的大气组成与结构我们也有了初步的了解，但冷气态巨行星还有待更多的发现与研究。通过对已发现的系外行星参数进行统计分析，我们初步揭示了 USP 行星的形成与演化过程、主星温度和金属丰度对行星形成率的影响等规律。

系外行星的探测项目主要分为地基与天基两大部分，地基观测历史最久，但观测精度有限，在天基项目出现前发现的大多是类木星；在天基观测项目出现后，我们有机会发现质量更小的行星，以开普勒望远镜为代表的一系列天基系外行星探测项目极大地扩充了系外行星的研究样本，使我们对于系外行星的数量分布、性质有了颠覆性的认知。在天基观测提供大量观测样本的前提下联合地基后随观测，可对候选体进行证认并确定行星的质量、半径、周期等基本参数。

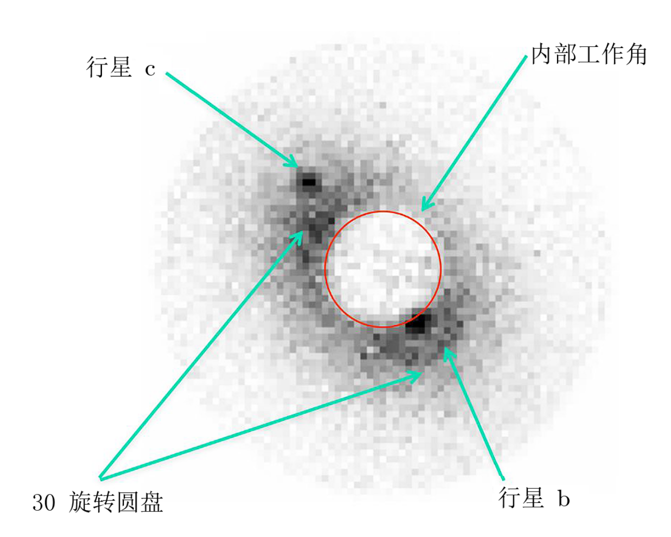
已发现的行星大部分位于银河系内，在更深邃的宇宙中还存在大量未知的系外行星，未来我们将利用更先进的观测技术，深入地探测这些系外行星。已发现的系外行星，还需要进一步补充观测数据和基本参数，并对已测定的行星质量、半径和轨道参数进行修正与确认，为性质研究和演化理论研究提供更准确的数据。得益于大口径观测仪器建造技术的成熟、仪器稳定性与精度的提高和观测分析方法的不断改进，系外行星相关的研究成果日新月异，发展迅速。随着越来越多的空间卫星和空间望远镜的运行，系外行星的样本也越来越大，对这些样本进行更深入的观测和特性研究，对于系外行星的形成与演化理论体系的完善十分重

要。对于已获取的数据，提高数据分析效率与准确性，或尝试使用其他新的分析方法，对系外行星性质研究也会有很大帮助。每一次观测仪器的更新换代与观测方法的改进都会使系外行星相关的科研产出发生爆发式的增长。这些新的技术与研究都是为了进一步发现近邻恒星的宜居行星，并完善行星系统参数，精细刻画其特性[147]，是接下来几年内系外行星探测与研究的目标。

5.2 系外行星探测研究发展趋势展望

5.2.1 系外行星的精细观测

目前系外行星地基后随观测大都使用凌星法和视向速度法。随着地基天文观测将建设更多大口径望远镜，我们将观测到更多系外行星的更多细节，获得比前两种间接探测系外行星的方法更高的观测精度。目前探测系外行星的大气、内部结构等细节，都是使用模型来拟合间接观测的结果，然后进行推测。由于探测方法的不足，已发现的系外行星还有很多基本参数是未知的，如周期、质量和半径等。我们希望对系外行星系统直接成像以获得更多细节。NASA 计划在 21 世纪 20 年代中期发射的 WFIRST (wide-field infrared survey telescope，2020 年 5 月更名为 Nancy Grace Roman Space Telescope) 将会重点基于微引力透镜法、直接成像法对系外行星进行深入观测，研究行星系统的黄道尘埃和系外行星的多样性。对系外行星进行直接成像将利用搭载的星冕仪 AFTA (astrophysics focused telescope assets) (图 6 展示了利用 AFTA 进行系外行星观测的模拟图像) 遮挡主星的光，以更高的分辨率观测类地行星与超级地球[148]。



注：图中显示了两颗直接观测到的行星，视场为 0.518″。

图 6　WFIRST-AFTA 日冕仪观测 Uma47 的模拟图像[148]

随着光学成像技术的飞速发展，未来会有更多大口径望远镜建成，我们可以更直接地观测系外行星并获得更多细节，如下一代 30 ~ 40 m 级望远镜 E-ELT (European extremely large telescope) 的 EPICS (exoplanet imaging camera and spectrograph) 终端[149]将专门用

来对已发现的系外行星候选体进行直接成像观测研究。直接成像法可以直接观测原行星盘的细节，提供更多原行星盘演化的信息，还可以弥补目前探测方法限制导致的对于长周期系外行星研究的不足。除了发展高分辨率成像技术，未来天基高分辨率光谱观测对于系外行星大气层的探测也将带来突破。目前对于巨行星的大气成分、结构研究相对较多；小型的岩质行星因为质量小而不具备浓厚的大气层，探测难度很大。对于地基光谱仪，探测行星大气的吸收线比较困难。高分辨率天基光谱仪的出现将改变系外行星大气研究的现状。

5.2.2 系外行星的深度探测

未来，更深入的空间系外行星探测项目将继续引导系外行星的发现与研究，而寻找宜居的类地行星将作为系外行星探测的重点。目前已经计划发射的空间系外行星探测项目主要有 PLATO (PLAnetary Transits and Oscillation of stars)[150] 和 JWST[48] 等。其中 PLATO 卫星将致力于寻找位于类太阳恒星宜居带内的类地行星，并探明他们的密度与年龄。PLATO 将系统性地探测和描述这些真正与地球相似的行星的许多性质，这些特殊的“地球兄弟”会揭示地球在太阳系内是如何形成与演化的，并且寻找最适合人类生存的“第二家园”。JWST 望远镜将使用部分观测时间对目前开普勒与 TESS 等望远镜探测到的系外行星进行大气层的观测与大气成分研究。欧洲太空总署在 2019 年 12 月 18 日发射了 CHEOPS (CHaracterizing ExoPlanet Satellite)[151]，它将重点研究超级地球和类海王星，通过高精度监测近邻已知存在系外行星的凌星现象，探明根据地基光谱视向速度观测确定质量的系外行星的半径，并对地基探测到的系外行星的光变曲线进行修正。

欧洲航天局计划在 2022 年发射 Euclid 望远镜，其将搭载一台 1.2 m 口径的望远镜和两台终端 (一台可见光波段相机和一台近红外低分辨率摄谱仪)。Euclid 将开展系外行星探测项目 ExELS (Exoplanet Euclid Legacy Survey)，分别对距离主星 1 AU 以外的宽轨小质量冷行星、热行星和亚恒星进行探测研究。我们将利用 Euclid 的观测结果，对发生掩食 (近距离) 和造成微引力透镜现象 (远距离) 的类木星进行直观的比较[152, 153]。国内也有多项正在计划和推动中的天基探测项目，其中由紫金山天文台牵头的近邻宜居系外行星搜寻计划 CHES (closeby habitable exoplanet survey，前身项目为系外行星探测卫星 search for terrestrial exoplanet, STEP)[154]，将搭载一台 1.2 m 的望远镜，采用天体测量法对近邻的类地行星与主星的相对角距离进行测量，通过消除传统窄视场天体测量中参考星位置与自行精度对检测系外行星的影响，预计探测的位置精度高于 1 μas，计划发射到日地 L2 轨道。CHES 将对太阳邻域约 100 颗 F, G, K 型恒星开展高精度定位测量，对可能存在的行星和位于宜居带的类地行星进行全面、精确的观测[155, 156]。目前 CHES 已经完成了有效载荷原理样机的研制。国家天文台正在牵头与多家单位共同筹备一个大型行星大气空间专项项目“天邻” (HABItable Terrestrial planetary ATmospheric Surveyor, HABITATS)，旨在通过长时间、多波段观测，获得各类系外行星尤其是岩石类行星的光谱，研究大气温度结构和组成，搜寻生命信号，寻找宇宙中新的绿洲和栖息地。初步考虑直径大于 4 m 的单镜面离轴三镜系统轻量化望远镜，配备高稳定度指向成像传感器、紫外到光学波段的高分辨率光谱仪和近红外波段的低分辨率光谱仪，发送到日地 L2 轨道，通过 5 ~ 10 a 的长时间观测，获得 10 个以上宜居带类地行星的光谱，搜寻其中可能存在的生命信号，如水、臭氧、甲烷和叶绿素。

在 NASA 规划的系外行星探测计划中 (见图 7)，还有更多的天基探测项目将开展更细致的系外行星研究，例如探测宜居带类地行星的 Starshade Rendezvous 和 HabEx (habitable exoplanet imaging mission)，探测围绕 M 型矮星的系外行星宜居性与冷气态行星的 OST (origins space telescope)，探测类地行星宜居性的 LUVOIR (large UV/Optical/IR)，确认系外行星生命是否有生命存在的空间干涉仪 Exo-Earth Interferometer 等，但这些项目的开展还需要完成许多新技术的突破[157]。

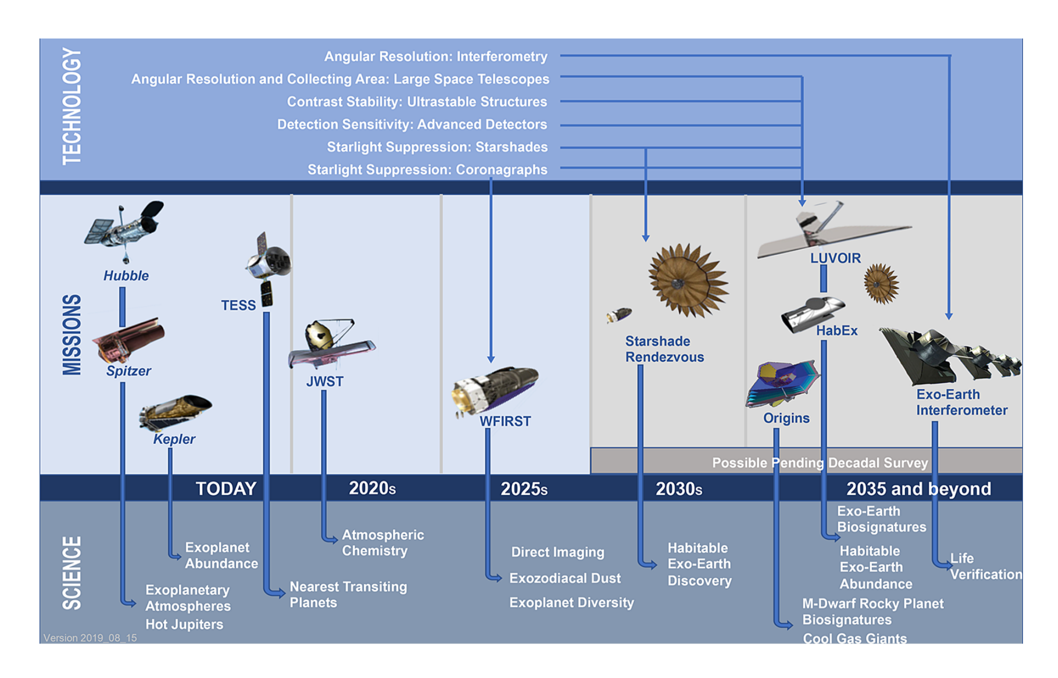


图 7　NASA 计划发射的系外行星探测路线图[157]

除了计划与新建中的巡天项目，利用现有的地基望远镜在系外行星探测与研究方面也将发挥长期的作用，例如 LSST (large synoptic survey telescope) 望远镜将在 10 a 内对南天 2/3 以上的天区进行 800 次左右的高精度巡天，除了主巡天计划外，LSST 还将深度观测 WFIRST 观测的一些系外行星[158, 159]。小望远镜可以对太阳系周围的亮星进行充分的系外行星探测，通常观测模式也较为灵活，在保证采样点足够多的情况下进行高效的观测。目前国内有很多通用型小望远镜正在长期参与系外行星的后随观测研究，例如兴隆观测站的 2.16 m 望远镜[160]和 60 cm 望远镜[161]等。在接下来 5 ~ 10 a 的观测研究过程中，地基望远镜将更多地配合天基望远镜进行大量的后随观测，在重点目标的长期监测与特殊机会目标的机动观测方面发挥更重要的作用，未来期待有更多高效的系外行星地基探测项目涌现。

5.2.3　新方法、新技术的应用

系外行星的后随观测是一项需要大量时间的高精度观测工作，在有限的观测时间内尽可能多观测系外行星不同相位的数据，需要在传统的观测调度模式上进行改进，利用人工智能实时优化观测策略，将提高系外行星的观测效率。首先需要提高系外行星及候选体的观测

效率，在地基望远镜后随观测计划制定上可以更加灵活，如在望远镜观测能力范围内的目标中选择需要补充基本参数的系外行星和待确认的候选体作为备选观测目标，根据观测条件与重要性进行排序后，在可观测时段进行后随观测，以保证有限的观测时间内尽可能多地获得系外行星及候选体的数据。

对于长周期系外行星监测和长期积累的观测数据，由于观测时序较长 (1 a 甚至几年)，系统噪声的积累造成的影响明显高于随机误差的影响[162]，如何获得较高精度的处理结果是一项挑战。现在人工智能在日常生活与科学研究中已经得到了广泛应用，如何更好地利用人工智能自动识别系外行星、规划系外行星后随观测也是今后的研究热点之一，这类高效的数据统计分析技术也将大量应用于天体物理实测的数据处理中，对于快速发掘系外行星观测数据中的信息十分必要。现有基于人工智能和机器学习算法已经有了识别系外行星信号的程序[163]，但准确率有待提高。对系外行星候选体的信号进行分类，如系统噪声、食双星和系外行星，是目前系外行星识别的常用方法[164]。由于目前发现的短周期系外行星较多，导致系外行星样本的类型与实际存在偏差，系外行星的快速识别与分类的准确性较低，未来还需要更大规模的系外行星样本对这类程序和算法进行训练优化，随着系外行星探测范围的扩大，这种偏差将会得到一定的修正。

致谢

感谢审稿人对本文提出的宝贵意见。感谢兴隆观测站 2.16 m, 1 m, 80 cm, 60 cm 望远镜全体工作人员的支持。本文部分工作得到中国科学院光学天文重点实验室开放课题资助。

参考文献：

[1] Léna P, Lebrun F, Mignard F. Observational astrophysics, Berlin: Springer, 1998: 113
[2] Fukugita M, Ichikawa T, Gunn J E, et al. AJ, 1996, 111: 1748
[3] Landolt A U. AJ, 1992, 104: 340
[4] Skrutskie M F, Cutri R M, Stiening R, et al. AJ, 2006, 131: 1163
[5] Wolszczan A, Frail D A. Nature, 1992, 355: 145
[6] Wolszczan A. Science, 1994, 264: 538
[7] Mayor M, Queloz D. Nature, 1995, 378: 355
[8] Henry G W, Marcy G W, Butler R P, et al. ApJ, 2000, 529: L41
[9] Charbonneau D, Brown T M, Latham D W, et al. ApJ, 2000, 529: L45
[10] Borucki W J, Koch D, Basri G, et al. Science, 2010, 327: 977
[11] https://www.nasa.gov/mission_pages/kepler/main/index.html, 2020
[12] Ricker G R, Winn J N, Vanderspek R, et al. SPIE Conference Series, 2014, 9143: 914320
[13] https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/docs/counts_detail.html, 2020
[14] Bakos G Á, Bayliss D, Bento J, et al. AJ, 2020, 159: 267
[15] Torres G, Kipping D M, Fressin F, et al. ApJ, 2015, 800: 99
[16] Heintz W D. JRASC, 1988, 82: 140
[17] Muterspaugh M W, Lane B F, Kulkarni S R, et al. AJ, 2010, 140: 1657
[18] http://exoplanet.eu/catalog/, 2020
[19] Benedict G F, McArthur B E, Forveille T, et al. ApJ,2002, 581: L115

[20] Benedict G F, McArthur B E, Gatewood G, et al. AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts, 2006, 38: 10.09
[21] Gaia Collaboration, Prusti T, de Bruijne J H J, et al. A&A, 2016, 595: A1
[22] Huggins W. Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series I, 1868, 158: 529
[23] Cumming A, Marcy G W, Butler R P. ApJ, 1999, 526: 890
[24] Queloz D, Henry G W, Sivan J P, et al. A&A, 2001, 379: 279
[25] Pepper J, Pogge R W, DePoy D L, et al. PASP, 2007, 119: 923
[26] Gandolfi D, Barragán O, Livingston J H, et al. A&A, 2018, 619: L10
[27] Fressin F, Torres G, Charbonneau D, et al. ApJ, 2013, 766: 81
[28] Abdul-Masih M, Prša A, Conroy K, et al. AJ, 2016, 151: 101
[29] Sullivan P W, Winn J N, Berta-Thompson Z K, et al. ApJ, 2015, 809: 77
[30] Howell S B, Everett M E, Sherry W, et al. AJ, 2011, 142: 19
[31] Tavani M, Brookshaw L. Nature, 1992, 356: 320
[32] Haghighipour N. Encyclopedia of Astrobiology. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2015: 1909
[33] Schwarz R, Haghighipour N, Eggl S, et al. MNRAS, 2011, 414: 2763
[34] Doyle L R, Carter J A, Fabrycky D C, et al. Science, 2011, 333: 1602
[35] Quarles B, Musielak Z E, Cuntz M. ApJ, 2012, 750: 14
[36] Holman M J, Murray N W. Science, 2005, 307: 1288
[37] Agol E, Steffen J, Sari R, et al. MNRAS, 2005, 359: 567
[38] Lithwick Y, Xie J, Wu Y. ApJ, 2012, 761: 122
[39] Kipping D, Nesvorn'y D, Hartman J, et al. MNRAS, 2019, 486: 4980
[40] Hermes J J. Handbook of Exoplanets. Berlin: Springer International Publishing, 2018: 6
[41] Murphy S J, Bedding T R, Shibahashi H. ApJ, 2016, 827: L17
[42] Einstein A. Science, 1936, 84: 506
[43] Chang K, Refsdal S. Nature, 1979, 282: 561
[44] Mao S, Paczynski B. ApJ, 1991, 374: L37
[45] Sumi T, Kamiya K, Bennett D P, et al. Nature, 2011, 473: 349
[46] Faigler S, Talor L, Mazeh T, et al. ApJ, 2013, 771: 26
[47] Jackson B, Adams E, Sandidge W, et al. AJ, 2019, 157: 239
[48] Gardner J P, Mather J C, Clampin M, et al. Space Sci. Rev., 2006, 123: 485
[49] ALMA Partnership, Brogan C L, Pérez L M, et al. ApJ, 2015, 808: L3
[50] Jin S, Li S, Isella A, et al. ApJ, 2016, 818: 76
[51] Pinte C, van der Plas G, Ménard F, et al. Nature Astronomy, 2019, 3: 1109
[52] Marois C, Macintosh B, Barman T, et al. Science, 2008, 322: 1348
[53] Marois C, Zuckerman B, Konopacky Q M, et al. Nature, 2010, 468: 1080
[54] Macintosh B A, Anthony A, Atwood J, et al. Proc. SPIE, 2014, 9148: 91480J
[55] 张牛, 季江徽. 天文学进展, 2009, 27: 14
[56] 赵佳, 赵刚. 天文学进展, 2012, 30: 48
[57] 田蕾, 季江徽. 天文学进展, 2015, 33: 27
[58] Espinoza N, Kossakowski D, Brahm R. Astrophysics Source Code Library, 2018, 12: 16
[59] Knutson H A, Howard A W, Isaacson H. ApJ, 2010, 720: 1569
[60] Gill S, Bayliss D, Cooke B F, et al. MNRAS, 2020, 491: 1548
[61] Wordsworth R D, Forget F, Selsis F, et al. ApJ, 2011, 733: L48
[62] Kopparapu R K, Ramirez R, Kasting J F, et al. ApJ, 2013, 765: 131
[63] Borucki W J, Koch D G, Batalha N, et al. ApJ, 2012, 745: 120
[64] Quintana E V, Barclay T, Raymond S N, et al. Science, 2014, 344: 277
[65] Huang C X, Burt J, Vanderburg A, et al. ApJ, 2018, 868: L39
[66] Gilbert E A, Barclay T, Schlieder J E, et al. AJ, 2020, 160: 116
[67] Espinoza N, Brahm R, Henning T, et al. MNRAS, 2020, 491: 2982

[68] Dawson R I, Johnson J A. ARA&A, 2018, 56: 175
[69] Winn J N, Fabrycky D, Albrecht S, et al. ApJ, 2010, 718: L145
[70] Fortney J J, Lodders K, Marley M S, et al. ApJ, 2008, 678: 1419
[71] Charbonneau D, Allen L E, Megeath S T, et al. ApJ, 2005, 626: 523
[72] 闫冬冬, 郭建恒. 天文学进展, 2019, 37: 384
[73] 黄秀敏, 季江徽. 天文学进展, 2020, 38: 1
[74] Gu P G, Lin D N C, Bodenheimer P H. ApJ, 2003, 588: 509
[75] Owen J E, Wu Y. ApJ, 2013, 775: 105
[76] Valsecchi F, Rappaport S, Rasio F A, et al. ApJ, 2015, 813: 101
[77] Jin S, Mordasini C, Parmentier V, et al. ApJ, 2014, 795: 65
[78] Lee E J, Chiang E. ApJ, 2017, 842: 40
[79] Petrovich C, Deibert E, Wu Y. AJ, 2019, 157: 180
[80] Pan M, Wang S, Ji J. MNRAS, 2020, 496: 4688
[81] Wang S, Ji J. ApJ, 2014, 795: 85
[82] Buchhave L A, Latham D W, Johansen A, et al. Nature, 2012, 486: 375
[83] Dong S, Xie J W, Zhou J L, et al. Proceedings of the National Academy of Science, 2018, 115: 266
[84] Zhu W. ApJ, 2019, 873: 8
[85] Garrett D, Savransky D, Belikov R. PASP, 2018, 130: 114403
[86] Yang J Y, Xie J W, Zhou J L. AJ, 2020, 159: 164
[87] Xie J W, Dong S, Zhu Z, et al. PNAS, 2016, 113: 11431
[88] Winn J N, Fabrycky D C. ARA&A, 2015, 53: 409
[89] Hatzes A P. Space Sci. Rev., 2016, 205: 267
[90] Mayor M, Pepe F, Queloz D, et al. The Messenger, 2003, 114: 20
[91] Pepe F, Molaro P, Cristiani S, et al. Astronomische Nachrichten, 2014, 335: 8
[92] Pepe F A, Cristiani S, Rebolo Lopez R, et al. Proceedings of the SPIE, 2010, 7735: 77350F
[93] Bakos G, Noyes R W, Kov'acs G, et al. PASP, 2004, 116: 266
[94] Bakos G Á, Csubry Z, Penev K, et al. PASP, 2013, 125: 154
[95] Pollacco D L, Skillen I, Collier Cameron A, et al. PASP, 2006, 118: 1407
[96] Donati J F, Kouach D, Lacombe M, et al. Handbook of Exoplanets. Berlin: Springer International Publishing, 2018: 107
[97] Kaiser N, Aussel H, Burke B E, et al. Proc. SPIE, 2002, 4836: 154
[98] Kaiser N, Burgett W, Chambers K, et al. Proc. SPIE, 2010, 7733: 77330E
[99] Alonso R, Brown T M, Torres G, et al. ApJ, 2004, 613: L153
[100] Wheatley P J, West R G, Goad M R, et al. MNRAS, 2018, 475: 4476
[101] https://www.nasa.gov/mission_pages/kepler/main/index.html, 2020
[102] Lovis C, Pepe F, Bouchy F, et al. Proc. SPIE, 2006, 6269: 62690P
[103] Lo Curto G, Pasquini L, Manescau A, et al. The Messenger, 2012, 149: 2
[104] Pepe F, Mayor M, Queloz D, et al. A&A, 2004, 423: 385
[105] http://www.eso.org/sci/facilities/lasilla/instruments/harps/overview.html, 2020
[106] Cosentino R, Lovis C, Pepe F, et al. Proc. SPIE, 2012, 84: 461V
[107] https://www.hq.eso.org/public/teles-instr/paranal-observatory/vlt/, 2020
[108] Cupani G, DÓdorico V, Cristiani S, et al. Astronomical Data Analysis Software an Systems XXIV, 2015, 495: 289
[109] Allart R, Lovis C, Pino L, et al. A&A, 2017, 606: A144
[110] Chen G, Casasayas-Barris N, Pallé E, et al. A&A, 2020, 635: A171
[111] Beuzit J L, Vigan A, Mouillet D, et al. A&A, 2019, 631: A155
[112] Lovis C, Snellen I, Mouillet D, et al. A&A, 2017, 599: A16
[113] https://wasp-planets.net/status/, 2020
[114] Hebb L, Collier-Cameron A, Loeillet B, et al. ApJ, 2009, 693: 1920

[115] Pál A, Bakos G Á, Torres G, et al. ApJ, 2008, 680: 1450
[116] Mikal-Evans T, Sing D K, Kataria T, et al. MNRAS, 2020, 496: 1638
[117] Nikolov N, Sing D K, Pont F, et al. MNRAS, 2014, 437: 46
[118] Ma B, Shang Z, Hu Y, et al. Nature, 2020, 583: 771
[119] Yuan X, Cui X, Gu B, et al. Proc. SPIE, 2014, 9145: 91450F
[120] Yuan X, Cui X, Liu G, et al. Proc. SPIE, 2008, 7012: 70124G
[121] Zhang H, Yu Z, Liang E, et al. ApJS, 2019, 240: 16
[122] Zhang H, Yu Z, Liang E, et al. ApJS, 2019, 240: 17
[123] Sato B. IAUS, 2014, 293: 1
[124] Liu Y J, Sato B, Zhao G, et al. Research in Astronomy and Astrophysics, 2009, 9: 1
[125] Liu Y J, Sato B, Zhao G, et al. ApJ, 2008, 672: 553
[126] Baglin A, Auvergne M, Barge P, et al. ESASP, 2006, 1306: 33
[127] Baglin A. Advances in Space Research, 2003, 31: 345
[128] https://corot.cnes.fr/en/COROT/lien1_res_scie.htm, 2020
[129] Barge P, Baglin A, Auvergne M, et al. A&A, 2008, 482: L17
[130] Alonso R, Auvergne M, Baglin A, et al. A&A, 2008, 482: L21
[131] Deleuil M, Deeg H J, Alonso R, et al. A&A, 2008, 491: 889
[132] Bouchy F, Deleuil M, Guillot T, et al. A&A, 2011, 525: A68
[133] Queloz D, Bouchy F, Moutou C, et al. A&A, 2009, 506: 303
[134] Bordé P, Bouchy F, Deleuil M, et al. A&A, 2010, 520: A66
[135] Lammer H, Dvorak R, Deleuil M, et al. Solar System Research, 2010, 44: 520
[136] Gillon M, Lanotte A A, Barman T, et al. A&A, 2010, 511: A3
[137] Kipping D M. MNRAS, 2010, 408: 1758
[138] Seader S, Jenkins J M, Tenenbaum P, et al. ApJS, 2015, 217: 18
[139] Welsh W F, Orosz J A, Carter J A, et al. Nature, 2012, 481: 475
[140] Stassun K G, Oelkers R J, Paegert M, et al. AJ, 2019, 158: 138
[141] Guerrero N. American Astronomical Society Meeting Abstracts, 2019, 233: 423
[142] Barclay T, Pepper J, Quintana E V. ApJS, 2018, 239: 2
[143] https://tess.mit.edu/publications/, 2020
[144] Bouma L G, Winn J N, Kosiarek J, et al. https://arxiv.org/abs/1705.08891, arXiv:1705.08891, 2017
[145] Huang C X, Shporer A, Dragomir D, et al. https://arxiv.org/abs/1807.11129, arXiv:1807.11129, 2018
[146] Gaia Collaboration, Brown A G A, Vallenari A, et al. A&A, 2018, 616: A1
[147] 周济林. 中国天文学会 2016 年学术年会摘要集, 南京: 中国天文学会, 2016: 5
[148] Spergel D, Gehrels N, Baltay C, et al. https://arxiv.org/abs/1503.03757, arXiv:1503.03757, 2015
[149] Kasper M, Beuzit J L, Verinaud C, et al. Proceedings of the SPIE, 2010, 7735: 77352E
[150] Rauer H, Catala C, Aerts C, et al. Experimental Astronomy, 2014, 38: 249
[151] Broeg C, Fortier A, Ehrenreich D, et al. EPJ Web of Conferences, 2013, 47: 03005
[152] Penny M T, Kerins E, Rattenbury N, et al. MNRAS, 2013, 434: 2
[153] McDonald I, Kerins E, Penny M, et al. MNRAS, 2014, 445: 4137
[154] Zhang X. Research in Astronomy and Astrophysics, 2020, 20: 099
[155] 陈鼎. 2013 中国天文学会年学术年会文集, 南京: 中国天文学会, 2013: 15
[156] 刘书瑀, 刘佳成, 朱紫. 天文学报, 2017, 58: 57
[157] https://exoplanets.nasa.gov/exep/technology/technology-overview/, 2020
[158] Ivezić Ž, Kahn S M, Tyson J A, et al. ApJ, 2019, 873: 111
[159] Street R A, Lund M B, Donachie M, et al. https://arxiv.org/abs/1812.04445, arXiv:1812.04445, 2018
[160] Sato B, Wang L, Liu Y J, et al. ApJ, 2016, 819: 59
[161] Wang Y H, Wang S, Hinse T C, et al. AJ, 2019, 157: 82
[162] Pont F, Zucker S, Queloz D. MNRAS, 2006, 373: 231
[163] Thompson S E, Mullally F, Coughlin J, et al. ApJ, 2015, 812: 46

[164] McCauliff S D, Jenkins J M, Catanzarite J, et al. ApJ, 2015, 806: 6

The Recent Progress of Detection and Research of Exoplanets

WANG Jia-qi[1,2], WANG Hui-juan[1,2], WANG Wei[1,3], LIU Yu-juan[1], ZHENG Jie[1], JIANG Xiao-jun[1,2]

(1. CAS Key Laboratory of Optical Astronomy, National Astronomical Observatories,Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. South America Center for Astronomy, China-Chile Joint Center for Astronomy, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: Exoplanets, as a significant section of researching the evolution of stars and finding the origin of life, have been one of the hotspots in the field of astronomy for many years. At present, nearly ten methods for detecting exoplanets have been developed. More than 4 000 exoplanets have been detected since 1992, as astronomical observatories have become more accurate. In recent years, space-based astronomical observation methods have become mature, while the precision and efficiency of detecting exoplanets have been greatly improved, which leads to the emergence of more ground-based exoplanet exploration projects. Following Kepler, the most successful exoplanets probe satellite, TESS was successfully launched in April 2018, then lots of astronomers and ground-based optical equipments around the world devoted in TESS photometric and spectroscopic observations, which ushered in the "golden age" of exoplanets detection and research. In this review, we introduce the methods and representative programs of exoplanets detection, summarize the research and evolution theory of earth-like planets and gas giant planets. At last, the research of exoplanets in the next 5—10 years are prospected.

Key words: exoplanet; space-base observation; follow-up observation; photometric observation; spectroscopic observation